

報告 モルタル試料を用いた単位容積質量法による超高強度コンクリートの単位水量管理

杉山 英祐^{*1}・梶田 秀幸^{*1}・宮野 和樹^{*1}

要旨：超高強度コンクリートの単位水量を迅速かつ正確に測定する方法として、ウェットスクリーニングしたモルタルの単位容積質量から単位水量を推定する方法を考案し、精度よく測定できることを確認した。また、その方法を実工事において設計基準強度 80N/mm²～130N/mm² クラスの超高強度コンクリートの単位水量管理に適用し、単位水量を管理することによって所要の強度を安定的に得ることができた。

キーワード：単位水量，超高強度コンクリート，単位容積質量法，モルタル，品質管理

1. はじめに

近年、コンクリートの高強度化が進んでいるが、安定した強度を得る上で単位水量を管理することは非常に有効である。設計基準強度（以下、 F_c と略記）60N/mm²クラスまでの高強度コンクリートの場合、圧縮強度試験用供試体採取時に単位水量の測定をして管理する方法が考えられるが、 F_c 60N/mm²を超える超高強度コンクリートの場合、さらに厳しい管理として、全ての生コン車に対し単位水量を測定することも行われている¹⁾。

筆者らは、単位水量の測定方法として、電子レンジを用いた高周波加熱乾燥法を採用しているが、この方法を用いると測定に20分程度かかり、1日の測定回数を大幅に増やすことは困難である。そこで、簡易な単位水量の測定方法としてエアメータを利用した単位容積質量法の超高強度コンクリートへの適用を検討してきた²⁾。

本報では、超高強度コンクリートにおける生コン車の全数検査が可能となる程度の、非常に簡易な単位水量の測定方法を考案し、実工事での超高強度コンクリートの品質管理に適用した結果について報告する。

2. 単位容積質量法の検討

2.1 試料採取方法の検討

(1) 粗骨材量の影響

単位容積質量法では、試料の採取が単位水量推定値に影響を及ぼし、採取されたコンクリート中の粗骨材量が計画調合の粗骨材量と異なる場合、推定値に誤差を生じると言われている³⁾。

そこで、粗骨材量が単位水量推定値に及ぼす影響を確認するための室内試験練りを行った。

表-1に使用材料を、表-2に調合条件を示す。実験は、異なる3種類の骨材を用いて実施した。単位水量の測定は、文献4)の方法に準拠して、容量約7リットルのコンクリート用エアメータを用い、それぞれ3回ずつ測定した。単位水量の推定値は(1)式より算出した。

$$W = W_0 + \frac{\gamma_2(1 - (10Air_0 + \alpha) \times 0.001) - M_c}{1 - \gamma_2 \times 0.001} \quad (1)$$

ここに、

W : 推定単位水量(kg/m³)

W_0 : 調合上の単位水量(kg/m³)

γ_2 : 試験で得られる空気量を除いた単位容積質量(kg/m³)

Air_0 : 調合上の空気量(%)

*1 前田建設工業（株） 技術研究所（正会員）

α : セメント粒子への水の浸潤による容積減少量(l/m^3)

M_c : 調合上のコンクリート $1m^3$ 当たりの質量(kg/m^3)

表-1 使用材料

	セメント	中庸熟ポルトランドセメント
case1	細骨材	陸砂：表乾密度 $2.58g/cm^3$ 砕砂：表乾密度 $2.65g/cm^3$
	粗骨材	砕石：表乾密度 $2.63g/cm^3$
	混和剤	高性能AE減水剤
	セメント	中庸熟ポルトランドセメント
case2	細骨材	山砂：表乾密度 $2.59g/cm^3$
	粗骨材	砕石：表乾密度 $2.65g/cm^3$
	混和剤	高性能AE減水剤
	セメント	中庸熟ポルトランドセメント
case3	細骨材	山砂：表乾密度 $2.58g/cm^3$ 砕砂：表乾密度 $2.69g/cm^3$
	粗骨材	砕石：表乾密度 $2.69g/cm^3$
	混和剤	高性能AE減水剤
	セメント	中庸熟ポルトランドセメント

表-2 調合条件

case	Fc (N/mm^2)	W/C (%)	W (kg/m^3)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)
case1	80	25.5	170	65	1.5
case2	80	25.5	170	65	1.5
case3	80	24.9	170	65	2.0

粗骨材の採取率は、単位水量測定後の試料から粗骨材を洗い出して粗骨材量を確認し、調合上の粗骨材量に対する比として算出した。また、粗骨材量の補正は、確認した粗骨材量から試料のモルタルの単位容積質量を算出し、調合上のモルタルの単位容積質量との差から算出した。

表-3に単位水量測定結果を示す。いずれのケースでも粗骨材量の補正を行うことで、標準偏差が小さくなることから、ばらつきを低減さ

表-3 単位水量測定結果

case	粗骨材の採取率(%)		単位水量推定値(kg/m^3)			
			粗骨材量の補正			
	平均値	標準偏差	無し	有り	平均値	標準偏差
case1	103.6	2.48	167.0	2.54	168.1	1.47
case2	102.7	1.46	165.0	1.21	165.9	0.60
case3	98.7	5.88	169.5	3.58	168.8	0.32

せるためには粗骨材量の補正が必要であることが確認された。

(2) 試料採取時間の短縮

実工事の荷卸し検査において、全ての生コン車に対して単位水量を測定するためには、測定時間が10分以内であることが望ましい。しかしながら、粗骨材を洗い出す方法は、測定時間が20分程度かかり、全車測定は困難である。

そこで、粗骨材量の補正を行う上で、粗骨材の洗い出しよりも迅速な方法として、ウェットスクリーニングしたモルタルを試料とする方法を考案した。

2.2 推定誤差低減のための検討

セメントの吸水現象により、コンクリートの実際の容積は調合上の容積よりも小さくなり、単位容積質量法ではこの影響を適切に考慮する必要がある。これまでの検討²⁾によって、容積減少量は結合材水比の影響を受ける傾向が見られた。

そこで、ウェットスクリーニングしたモルタルを試料とする単位容積質量法による単位水量測定の推定精度を検討するために室内試験練りを実施した。

(1) 使用材料および調合

表-4に使用材料を、表-5に調合条件を示す。セメントはシリカフェーム混入セメントを使用した。水セメント比は、 $Fc100N/mm^2 \sim 150N/mm^2$ 程度を想定して14~23%とし、単位水量は $150kg/m^3$ とした。

表-4 使用材料

セメント	シリカフェーム混入セメント
細骨材	山砂：表乾密度 $2.59g/cm^3$
粗骨材	砕石：表乾密度 $2.66g/cm^3$
混和剤	高性能AE減水剤

表-5 調合条件

調合記号	W/C (%)	W (kg/m^3)	目標スランブ フロー(cm)	目標 空気量 (%)
SF14	14.0	150	70	1.5
SF17	17.0	150	70	1.5
SF23	23.0	150	65	1.5

(2) 測定方法

ウェットスクリーニングは振動ふるい機を用いて行った。モルタル試料の容積，質量，空気量は，容量約 2 リットルのモルタル用エアメータを用いて測定した。

容積減少量は，ウェットスクリーニングしたモルタルの空気量を除いた単位容積質量の実測値と調合上の値との差が，単位水量が正確ならば，容積の変化のみによるものとし，コンクリート 1m³ 当たりの値として算出した。

単位水量は，モルタル試料 1m³ 中の水量を算出し，それをコンクリート 1m³ 中の水量に換算して推定した。モルタル試料 1m³ 中の水量は，(1)式をモルタル試料 1m³ 中の水量を算出する式に修正して算出した。

測定回数は，1 調合当たり 3 回とした。また，比較のために，コンクリートを試料とし，容量約 7 リットルのコンクリート用エアメータを用いた方法でも単位水量を測定した。

なお，上記の容積減少量は，ウェットスクリーニングモルタルを試料に用いて算出しているため，この値を単位水量測定に用いることで，ウェットスクリーニングが単位水量測定結果に及ぼす影響は補正されるものと考えられる。

(3) 測定結果

図-1 に単位セメント量と容積減少量の関係を示す。容積減少量は，単位セメント量が多くなるにつれて増加する傾向にあった。以下の単位水量の測定では，これらの値を容積減少量として用いた。

表-6 に単位水量測定結果を示す。モルタルを試料とすることで，いずれの調合でも平均値は調合上の単位水量に近くなり，標準偏差も小さくなっている。このことから，より精度の高い単位水量の測定が可能になると考えられる。

以上の結果から，事前に容積減少量を確認し，ウェットスクリーニングしたモルタルを試料として単位水量の測定を行えば，簡易かつ精度よく単位水量を測定できると考えられる。

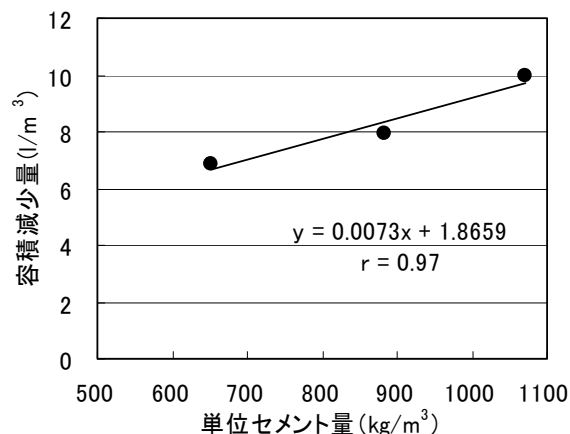


図-1 単位セメント量と容積減少量の関係

表-6 単位水量測定結果

調合記号	単位水量推定値(kg/m ³)			
	コンクリート試料		モルタル試料	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
SF14	153.4	2.97	151.8	1.39
SF17	151.7	2.55	150.2	1.10
SF23	153.5	2.01	152.8	0.95

3. 実工事への適用事例

現在，関東地区で施工中の高層 RC 集合住宅新築工事において，超高強度コンクリートの単位水量管理にモルタル試料を用いた単位容積質量法を適用した事例を報告する。

3.1 コンクリートの概要

モルタル試料を用いた単位容積質量法による単位水量測定を適用した超高強度コンクリートは Fc80N/mm², 100 N/mm², 130 N/mm² である。Fc80N/mm² を供給する生コン工場は 4 工場，Fc100N/mm² は 3 工場，Fc130N/mm² は 2 工場である。表-7 に使用材料を，表-8 に調合条件例をそれぞれ示す。

いずれの工場でも Fc80N/mm² では中庸熱ポルトランドセメントを使用し，単位水量は 170kg/m³，Fc100N/mm²，130N/mm² ではシリカフェーム混入セメントを使用し，単位水量は 150kg/m³ である。水セメント比は Fc80N/mm² で 24.0～25.5%，Fc100N/mm² で 20.0～22.5%，Fc130N/mm² で 16.0～17.0% である。

表－7 使用材料

工場 A	セメント	シリカフェーム混入セメント	中庸熟ポルトランドセメント
	細骨材	砕砂1：表乾密度 2.64g/cm ³	陸砂：表乾密度 2.58g/cm ³
			砕砂2：表乾密度 2.65g/cm ³
	粗骨材	砕石：表乾密度2.63g/cm ³	
混和剤	高性能AE減水剤		
工場 B	セメント	シリカフェーム混入セメント	中庸熟ポルトランドセメント
	細骨材	山砂：表乾密度2.59g/cm ³	
	粗骨材	砕石：表乾密度2.65g/cm ³	
	混和剤	高性能AE減水剤	
工場 C	セメント	中庸熟ポルトランドセメント	
	細骨材	山砂：表乾密度2.58g/cm ³	
		砕砂：表乾密度2.69g/cm ³	
	粗骨材	砕石：表乾密度2.69g/cm ³	
混和剤	高性能AE減水剤		
工場 D	セメント	中庸熟ポルトランドセメント	
	細骨材	山砂：表乾密度2.58g/cm ³	
		砕砂：表乾密度2.69g/cm ³	
	粗骨材	砕石：表乾密度2.64g/cm ³	
混和剤	高性能AE減水剤		

表－8 調合条件例

工場	Fc (N/mm ²)	セメント種類*	W/C (%)	W (kg/m ³)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)
A	130	SFC	17.0	150	70	1.5
	100	SFC	20.0	150	70	1.5
	80	MC	25.5	170	65	1.5
B	130	SFC	16.0	150	70	1.5
	100	SFC	22.5	150	70	1.5
	80	MC	24.0	170	65	1.5
C	80	MC	24.9	170	65	2.0
D	80	MC	25.5	170	65	1.5

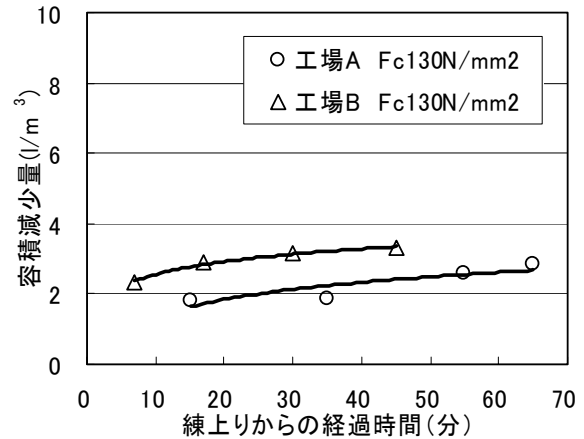
* SFC:シリカフェーム混入セメント
MC:中庸熟ポルトランドセメント

3.2 容積減少量の確認

実工事で使用するコンクリートの品質確認のための室内試験練り時に、2.2(2)に示した方法で容積減少量を確認した。使用材料、調合条件例は表－7、表－8のとおりである。

図－2に容積減少量の経時変化の一例としてFc130N/mm²の結果を示す。図－2に示すとおり、容積減少量は練上がり直後の値からやや増加する傾向が見られた。そこで、工事現場までの輸送時間を考慮して、練上がり直後の値を除いた平均値を容積減少量として設定した。表－9に容積減少量の算定結果を示す。ただし、工場 A の Fc 100N/mm²については算定結果が-0.45 l/m³

となったため、単位水量測定結果が安全側となるように 0.00 l/m³とした。この理由は解明していないが、骨材の品質やウェットスクリーニングの影響を受けたものと思われる。



図－2 容積減少量の経時変化 (Fc130N/mm²)

表－9 容積減少量算定結果

工場	Fc (N/mm ²)	セメント種類*	容積減少量 (l/m ³)
A	130	SFC	2.44
	100	SFC	0.00
	80	MC	2.71
B	130	SFC	3.12
	100	SFC	2.41
	80	MC	8.60
C	80	MC	2.11
D	80	MC	6.41

* SFC:シリカフェーム混入セメント
MC:中庸熟ポルトランドセメント

3.3 単位水量の測定概要

単位水量の測定は、Fc80N/mm²では当日の生コン車 1 台目および圧縮強度管理用供試体採取時の合計 4 回行い、Fc100N/mm²、130N/mm²では全ての生コン車に対して行った。なお、単位水量の管理値は調合上の単位水量±15kg/m³であり、1日の打設数量は20～50m³程度であった。

測定は工事現場に設置したコンクリート試験ヤードで行った。1回の測定は、ウェットスクリーニングに約 5～6 分、空気量の測定に約 2～3 分かかり、質量測定、計算等を含めた全体でおよそ 10 分程度であった。スランプフロー等のフレッシュコンクリート試験と並行して行うことで、十分に全数検査が可能であった。

3.4 単位水量の測定結果

表-10に単位水量測定結果を、図-3に測定結果の例として工場Aと工場Bの単位水量推定値と調合との差のヒストグラムをFc別に示す。いずれの測定結果の平均値も±5kg/m³以内とほぼ調合値に近い値であった。標準偏差は3.02kg/m³~5.85kg/m³の範囲であり、図-3のヒストグラムからもわかるようにごく一部の測定結果を除いて±10kg/m³の範囲に入っており、単位水量の変動は非常に小さかったと考えられる。なお、表-10中の工場A、工場Cの最小値に-14.1kg/m³、-14.0kg/m³があるが、これらはいずれもその打設日の1台目の推定値であり、細骨材の表面水率を安全側に設定した影響と考えられる。

図-4に工場AのFc100N/mm²の単位水量とスランプフローの測定結果の一部を示す。測定回数は打設回数と生コン車台数を表している。この図から、スランプフローの日内変動の傾向は、単位水量の日内変動の傾向とよく一致しており、単位水量が大きくなるとスランプフローも大きくなる傾向が見られる。図に示した範囲では、単位水量はほぼ-10kg/m³~+5kg/m³、スランプフローはほぼ-5cm~+5cmの範囲に入っており、良好な管理状態であったといえる。

図-5に工場Aと工場Bの単位水量測定から求めたセメント水比と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は単位水量を測定した際に同一の生コン車から採取したφ100×200mmの標準養生供試体3本の平均値である。材齢は7日と調合強

表-10 単位水量測定結果

工場	Fc (N/mm ²)	個数	推定値と調合との差(kg/m ³)			
			平均値	標準偏差	最大値	最小値
A	130	30	0.2	3.48	8.2	-7.8
	100	61	-3.3	3.86	5.1	-14.1
	80	101	1.2	3.02	9.0	-4.0
B	130	12	3.3	4.15	11.4	-2.7
	100	40	-1.8	4.11	7.0	-10.6
	80	65	2.1	4.09	9.5	-9.6
C	80	60	-1.1	5.85	9.4	-14.0
D	80	27	-0.8	3.11	7.3	-5.7

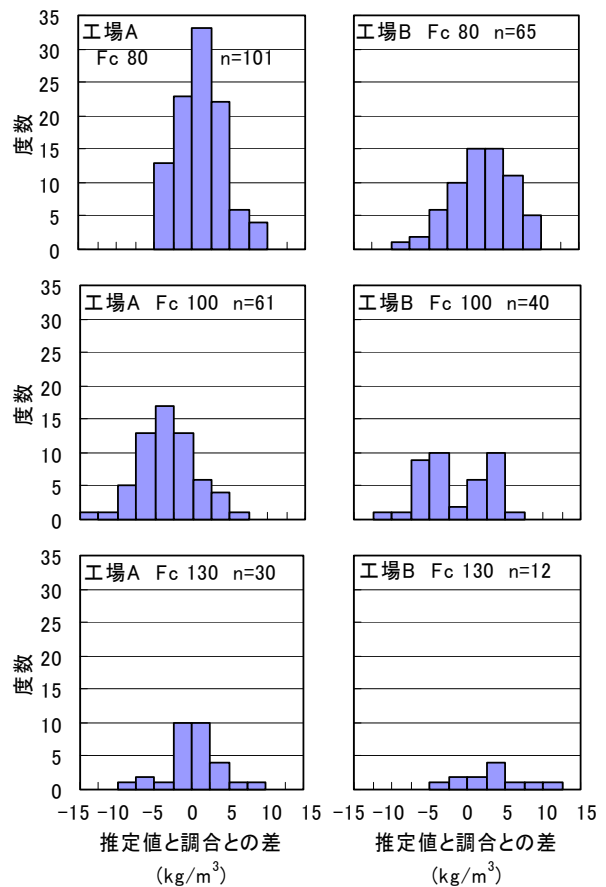


図-3 単位水量推定値と調合との差のヒストグラム

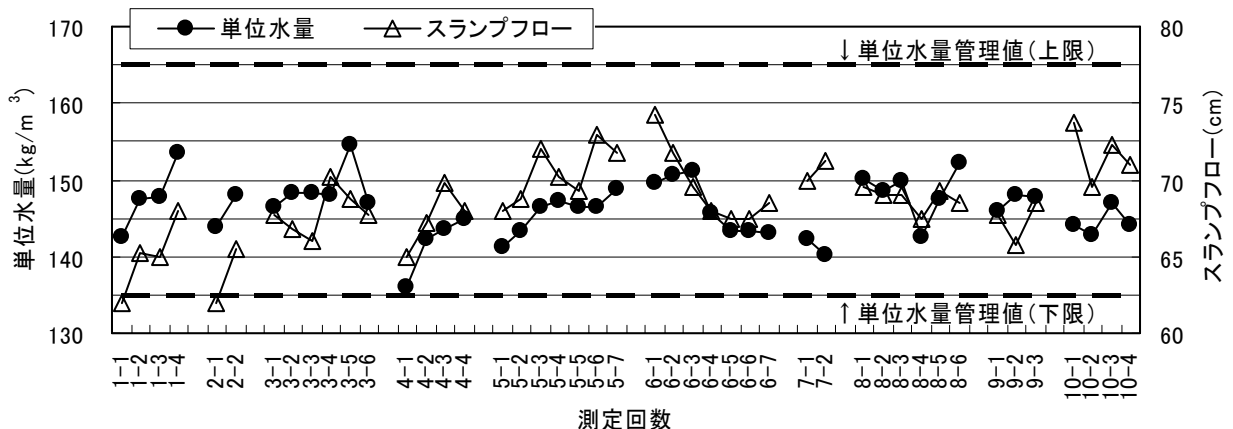


図-4 単位水量とスランプフローの測定結果

度管理材齢の56日である。セメント水比と圧縮強度は高い相関関係にあり、単位水量推定値が大きい（セメント水比が小さい）と圧縮強度は低くなることがわかる。なお、工場AのFc100N/mm²の材齢56日については、圧縮強度の変動係数が約2%（表-11）と非常に小さいため、相関が低くなった。

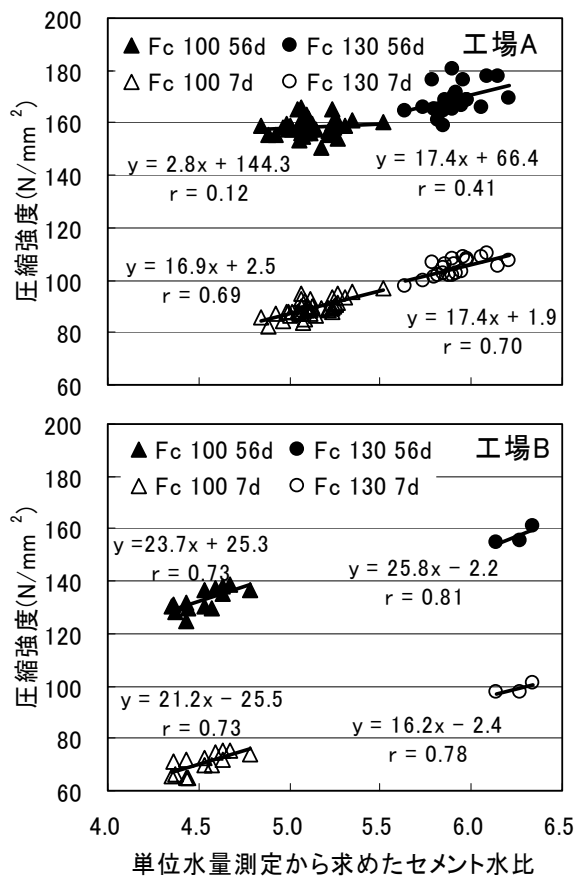


図-5 単位水量測定から求めたセメント水比と圧縮強度の関係

表-11 圧縮強度試験結果

工場	Fc (N/mm ²)	個数	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)		変動係数 (%)
				平均値	標準偏差	
A	130	21	56	169	5.73	3.39
	100	38	56	159	3.19	2.01
	80	39	28	125	5.50	4.41
B	130	3	56	157	3.18	2.03
	100	14	56	133	4.26	3.21
	80	21	28	109	6.03	5.55
C	80	43	28	109	4.40	4.04
D	80	4	28	129	3.79	2.94

表-11に圧縮強度試験結果を示す。全ての生コン車の単位水量を測定したFc100N/mm²、130N/mm²では、圧縮強度の変動が小さく、変動係数は4%以下であった。このことから、単位水量管理は安定した強度を得る上で重要であり、単位水量を管理することで圧縮強度の変動係数が小さくなるものと考えられる。

4. まとめ

超高強度コンクリートの単位水量を迅速かつ正確に測定する方法として、ウェットスクリーニングしたモルタルの単位容積質量から推定する方法を考案し、その方法を実工事に適用した。その結果、単位水量を管理することによって所要の強度を安定的に得ることができた。

謝辞

コンクリートの製造に御協力頂きましたアサノコンクリート(株)品川工場、アサノコンクリート(株)深川工場、関東宇部コンクリート工業(株)豊洲工場、晴海小野田レミコン(株)の皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 並木哲ほか：Fc80~100N/mm²の高強度コンクリートの品質管理，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.959-960，2003.9
- 2) 杉山英祐ほか：エアメータによる単位水量推定法の超高強度コンクリートへの適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.597-598，2004.8
- 3) 袴谷秀幸ほか：単位容積質量法による単位水量測定の測定精度に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.617-618，2003.9
- 4) エアメータ法による単位水量推定マニュアル（土木研究所法）